

Abfluß und Abflußschwankungen im periglazialen Milieu Hydrologische Untersuchungen in Zentral- Island

Schunke, Ekkehard

Veröffentlicht in:
Abhandlungen der Braunschweigischen
Wissenschaftlichen Gesellschaft Band 32, 1981,
S.7-24



Verlag Erich Goltze KG, Göttingen

Abfluß und Abflußschwankungen im periglazialen Milieu Hydrologische Untersuchungen in Zentral-Island

Von **Ekkehard Schunke**, Göttingen

Vorgelegt von Hans Poser

(Eingegangen am 13.8.1981)

Zusammenfassung

Am Beispiel der Flüsse Blanda und Vatnsdalsá in Zentral-Island werden das Abflußverhalten von periglazialen Flußsystemen mit und ohne Gletscheranschluß und seine Einbindung in den Wasserhaushalt untersucht, und zwar anhand langfristiger Abflußmessungen seit 1949. Gemeinsames Kennzeichen des Abflußverhaltens beider Flußsysteme sind die hohen Abflußfaktoren von 0,83 bzw. 0,78 sowie der große Einfluß der frühsummerlichen Schneeschmelze. Der Wasserhaushalt beider Flußsysteme weist einen markanten Jahresgang des Vorrates auf, wobei das Vorratsmaximum im April besteht. Die jährliche Abflußspende und Abflußhöhe der Vatnsdalsá (ohne direkten Gletscheranschluß) erreichen im Mittel nur 76% der Werte der Blanda (mit direktem Gletscheranschluß). Das montan-nivale Abflußregime der Vatnsdalsá hat eine Abflußspitze im April/Mai, das niveo-glaziale Regime der Blanda hingegen zwei Abflußspitzen im April/Mai und im Juli/August. Die jährliche Abflußmenge variiert in Abhängigkeit von der Veränderung der klimatischen Parameter. Dabei entspricht ein deutlicher Rückgang der Abflußmengen in den 60er bis 70er Jahren dieses Jahrhunderts einer markanten Abnahme der Wärmesumme. Niederschlagsveränderungen beeinflussen zwar den Abfluß der Vatnsdalsá, kaum hingegen denjenigen der Blanda.

Summary

The rivers Blanda and Vatnsdalsá in Central Iceland are taken as examples for a study of the runoff behaviour of periglacial river systems with and without connection to glaciers. The interrelation between the runoff and the other elements of the water budget is investigated. For these purposes, long-term discharge measurements starting in 1949 are available. Characteristic features of the runoff behaviour of both river basins are the high runoff coefficients of 0.83 and 0.78 respectively and the determining influence of the foresummer snow-break. The water budget of either drainage basin shows a marked annual course of the water storage, the maximum reservoir contents existing in April. The mean annual runoff of the Vatnsdalsá area (without direct connection to a glacier) only amounts to 76% of the value for the Blanda area (possessing a direct connection to glaciers). Vatnsdalsá which follows a nival mountain

runoff regime has its discharge peak in April/May, whereas Blanda, which follows a niveo-glacial regime, shows two peaks in April/May and in July/August. The annual discharge totals varies depending on changes of the climatic parameters. Lower discharge totals during the 1960ies and early 1970ies is in accordance with a drop in the degree-days above 0°C. The long-term discharge of the Vatnsdalsá is clearly influenced by the variations of the precipitation, that of the Blanda only to a small extent.

1. Einleitung

Innerhalb des klimatisch differenzierten Wasserhaushaltes der Erde sind Abfluß und Wasserhaushalt von Flußsystemen im arktisch-periglazialen Milieu weitgehend unbekannt. Seit den Talstudien von H. Poser (1932, 1936) im arktischen Bereich und den klimatisch-geomorphologischen Konzeptionen von J. Büdel (1948, 1950) bildet die fluviale Formung einen wichtigen Schwerpunkt der Periglazialforschung, es mangelt jedoch an genaueren quantitativen Kenntnissen über das hydrologische Regime im periglazialen Milieu. Die wenigen bislang vorliegenden Untersuchungen hierzu gründen sich meist auf sehr kurzfristige Messungen (vgl. V.T. Church 1972, S.B. Mac Cann et al. 1972, S.B. MacCann und J.G. Cogley 1972, 1973, A. Seifried 1972, G. Nagel 1979). Von besonderem Interesse, nicht zuletzt mit Blick auch auf Nut-

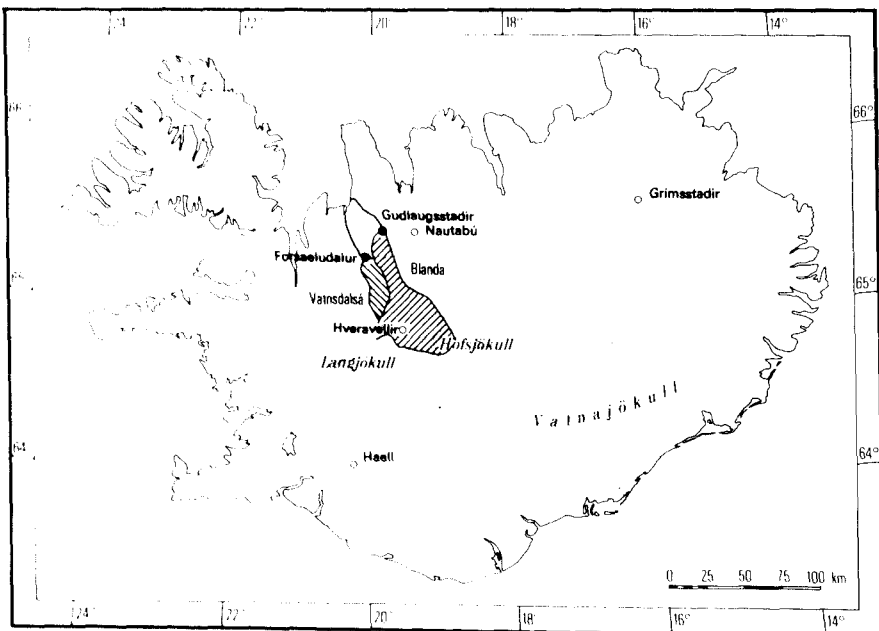


Abb. 1:
Übersichtskarte.

zungsmöglichkeiten des Hydroenergiepotentials, sind im periglazialen Milieu nicht nur der Abfluß und seine Einbindung in den Wasserhaushalt sowie das Abflußverhalten von Flußsystemen mit und ohne Gletscheranschluß, sondern vor allem auch die Veränderlichkeit des Abflusses und ihre klimatischen Steuerungsfaktoren.

Da auf Island seit Ende der 1940er Jahre an verschiedenen Stellen kontinuierliche Abflußmessungen durchgeführt werden (vgl. S. Rist 1956, 1969), ergibt sich am Beispiel des periglazialen Zentral-Islands die seltene Möglichkeit, die hydrologischen Verhältnisse von periglazialen Flußgebieten aufgrund eines langfristigen Datenermaterials quantitativ zu erfassen und in ihrer Variabilität zu untersuchen. Die folgenden Ausführungen gründen sich außer auf Geländebeobachtungen während der Jahre 1970–1980, die finanziell durch die Akademie der Wissenschaften in Göttingen gefördert wurden, vor allem auf die Auswertung von täglichen Abflußmessungen in den beiden benachbarten Flußsystemen der Blanda (mit direktem Gletscheranschluß) und der Vatnsdalsá (ohne direkten Gletscheranschluß) in Zentral-Island (vgl. Abb. 1). Das hydrologische Originalmaterial wurde dankenswerterweise von der Hydrologischen Abteilung (Leitung: S. Rist) der isländischen Energiebehörde Orkustofnun zur Verfügung gestellt.

Die Fragestellung der vorliegenden Arbeit gilt im besonderen: 1. dem jährlichen Abfluß, 2. dem mittleren Jahresgang des Abflusses, 3. der Differenzierung des Abflußverhaltens bei periglazialen Flußsystemen mit und ohne Gletscheranschluß und 4. der zeitlichen Variabilität des Abflußverhaltens und ihrer Kausalitätsbeziehung zu klimatischen Veränderungen. Der Bezugszeitraum ist das hydrologische Jahr Islands vom 1. September bis 31. August (vgl. S. Rist 1956, 31). Dabei erfolgt die Benennung nach dem Kalenderjahr, dem die Monate Januar bis August angehören.

Die Flußgebiete der Blanda und Vatnsdalsá liegen oberhalb der Basishöhe der Pegel Gudlaugsstadir (130 m ü. M.) und Forsaeludalur (70 m ü. M.). Auf der Basis der Grenzen oder oberirdischen Einzugsgebiete, von denen die unterirdischen Einzugsgebiete bekanntlich stark abweichen können, umfaßt das Flußgebiet der Blanda 1690 km², das der Vatnsdalsá 450 km². Vom Einzugsgebiet der Blanda befinden sich 200 km² (= 12%) auf den Eisschilden des Hof- und Langjökull. Wie die durch die Station Hveravellir (641 m ü. M.) im Untersuchungsgebiet registrierten Mitteltemperaturen (1966–1979) des wärmsten Monats (Juli) von 6,9°C und des kältesten Monats (Januar) von –6,9°C ausweisen, herrscht hier ein ET-Klima nach W. Köppen (1931). Es ist demjenigen West-Spitzbergens vergleichbar (vgl. E. Schunke und H. Stingl, 1973).

Das Relief des Untersuchungsraumes wird durch weitgespannte Ebenheiten gekennzeichnet, die von einzelnen Bergrücken und von den Eisschilden des Hof- und Langjökull überragt werden. Die Gesteine werden im wesentlichen von tertiären und pleistozänen Basalten in vorwiegend flacher Lagerung gebildet. Hinzu kommen Hyaloklastite der Palagonit-Formation und holozäne Laven. Den prä-holozänen Festgesteinen liegen weithin glaziale und glazi-fluviale Sedimente flächendeckend auf. Hinsichtlich ihrer allgemeinen hydrologischen Eigenschaften sind die Basalte wenig wasserdurchlässig. Stärker permeabel hingegen sind die Hyaloklastite und vor allem

die postglazialen Laven, deren Verbreitungsarealen ein oberirdisches Entwässerungsnetz fast völlig fehlt. Auch den glazigenen Lockergesteinen kommt eine große Wasserdurchlässigkeit zu (vgl. H. Tómasson und S. Thorgrímsson 1972, S. Thorgrímsson 1973, A. Gudmundsson und B. Jónson 1979). Nach der Beschaffenheit der Aquifere muß also mit unterirdischen Wasserbewegungen gerechnet werden, vor allem im Südteil beider Flußgebiete. Die Vegetation ist für den Abfluß des Untersuchungsraumes von nur geringem Einfluß, da große Bereiche des Gebietes vegetationsfrei sind (vgl. Abb. 2).



Abb. 2:

*Vegetationslose Periglaziallandschaft mit Sohlental (periodische Wasserführung).
Flußgebiet der Vatnsdalsá, 750 m ü. M. (13. 8. 1976).*

Die Blanda tritt mit zahlreichen anastomosierenden Gewässern am Nordrand des Hofsjökull an die Oberfläche. Die Quellflüsse der Vatnsdalsá setzen in rund 15 km Entfernung vom Nordrand des Langjökull ein. In beiden Flußsystemen gibt es perennierende Nebenflüsse, Seen und vor allem zahlreiche Schmelzwasserbahnen, die außerhalb der Schneeschmelze trocken liegen (vgl. Abb. 2). Das Gebiet der Blanda hebt sich von dem der Vatnsdalsá vornehmlich ab durch seinen Gletscheranschluß, seine erheblich größere Gebietsfläche, seine längere Laufstrecke (Blanda: 89 km; Vatnsdalsá: 34 km) und durch sein geringeres mittleres Gefälle (Blanda: 7,5‰; Vatnsdalsá: 17,9‰).

2. Der Abfluß und sein Jahresgang im langfristigen Mittel

Der Abfluß der Blanda wird bei Gadlaugsstadir, derjenige der Vatnsdalsá bei Forsaeludalur durch Pegelregistrierungen gemessen. Von den Elementen der Grundgleichung des Wasserhaushaltes $N = A + V$ ist der Abfluß am genauesten erfaßt. Der Abfluß wird charakterisiert durch die Abflußmenge Q (in $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$), die Abflußmengensumme $\sum Q$ (in Gl; Gl = Gigaliter), die Abflußspende q (in $1 \text{ s}^{-1} \text{km}^{-2}$) und durch die Abflußhöhe $q-p$ (in mm). Die Mittelwerte des jährlichen Abflusses für den Zeitraum 1950–1979 finden sich in Tab. 1 zusammengestellt.

	Sep.	Okt.	Nov.	Dez.	Jan.	Feb.	März	Apr.	Mai	Jun.	Jul.	Aug.	Jahr	
Blanda	Abflußmenge (m³s⁻¹)	46 (10)	38 (11)	28 (10)	24 (10)	22 (10)	24 (14)	27 (14)	48 (26)	73 (26)	56 (19)	61 (13)	63 (16)	42 (6)
	Abflußmenge (Gl)	118 (26)	100 (31)	71 (26)	63 (27)	58 (26)	59 (34)	72 (39)	124 (69)	195 (72)	144 (50)	163 (35)	167 (43)	1336 (199)
	Abflußspende (l s⁻¹km⁻²)	27 (6)	22 (6)	16 (6)	14 (6)	13 (6)	14 (8)	16 (8)	28 (16)	43 (16)	33 (11)	36 (7)	37 (9)	25 (4)
	Abflußhöhe (mm)	70 (16)	60 (18)	42 (16)	37 (16)	35 (16)	37 (21)	43 (23)	74 (41)	119 (43)	85 (30)	98 (20)	99 (25)	799 (115)
	Abflußvarianz (%)	22	30	38	43	46	57	54	55	36	35	20	25	14
Vatnsdalsá	Abflußmenge (m³s⁻¹)	6 (1)	7 (1)	7 (1)	7 (1)	6 (1)	7 (2)	7 (2)	13 (5)	19 (8)	11 (4)	7 (1)	6 (1)	8 (1)
	Abflußmenge (Gl)	16 (2)	18 (3)	17 (3)	17 (3)	17 (4)	16 (4)	20 (7)	33 (15)	51 (21)	28 (11)	18 (3)	16 (2)	267 (33)
	Abflußspende (l s⁻¹km⁻²)	14 (2)	15 (3)	15 (3)	14 (3)	14 (3)	15 (4)	17 (5)	28 (12)	42 (17)	25 (10)	15 (2)	14 (2)	18 (2)
	Abflußhöhe (mm)	36 (5)	40 (8)	38 (7)	38 (9)	38 (9)	36 (11)	44 (16)	70 (31)	111 (48)	64 (26)	40 (7)	36 (5)	591 (73)
	Abflußvarianz (%)	15	20	18	24	24	30	36	44	43	41	18	15	12

Tab. 1:

Der mittlere monatliche und jährliche Abfluß der Blanda und Vatnsdalsá (1950–1979)
(in Klammern: Standardabweichung).

Der mittlere jährliche Abfluß

Der Abfluß der Blanda erreicht deutlich größere Werte als derjenige der Vatnsdalsá. Und zwar beträgt die Abflußmenge der Vatnsdalsá insgesamt nur 20 Prozent derjenigen der Blanda. Unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Flächengröße der beiden Flußgebiete verringert sich diese Differenz: Abflußspende und Abflußhöhe der Vatnsdalsá erreichen rund 76 Prozent der Werte für die Blanda. Die mittlere Varianz des jährlichen Abflusses beider periglazialer Flußsysteme weist nur geringfügige Unterschiede auf. Die Diskrepanz der Abflußspenden und Abflußhöhen dieser beiden unmittelbar benachbarten Flußgebiete spiegelt deutlich wider, daß zum Einzugsgebiet der Blanda die Eisschilde von Hofs- und Langjökull gehören und somit die Blanda im Unterschied zur Vatnsdalsá auch von oberflächlich abfließendem Gletscherwasser gespeist wird.

Der Abfluß ergibt sich im langfristigen Mittel im wesentlichen aus der Differenz zwischen Gebietsniederschlag und Gebietsverdunstung. Dabei muß für die Niederschlagsmessung ganz allgemein mit größeren Ungenauigkeiten gerechnet werden (vgl. M. Einarsson 1972, 21; K. Richter 1981, 23). Der mittlere jährliche Gebietsniederschlag, der auf der Basis einer vom Meteorologischen Dienst Islands erstellten Niederschlagskarte (vgl. J. Eythorsson und H. Sigtryggsson 1971, 36) mit Hilfe von Planimetrierverfahren und Korrelationsanalysen unter Berücksichtigung des Niederschlagsverhaltens der außerhalb der Flußgebiete gelegenen Stationen Nautabú (115 m ü. M.) und Haell (121 m ü. M.) berechnet wurde, beträgt für das Blanda-Gebiet 997 mm und für das Vatnsdalsá-Gebiet 617 mm. Der Niederschlag im Flußgebiet der Vatnsdalsá erreicht damit nur 62 Prozent von demjenigen des Blanda-Gebietes. Dieser beträchtliche Unterschied der Niederschlagshöhe in zwei unmittelbar benachbarten Flußgebieten ist vor allem darauf zurückzuführen, daß der Südteil des Einzugsgebietes der Blanda mit den bis zu 1765 m ü. M. aufragenden Eisschilden des Hof- und Langjökull größere Höhen über dem Meeresspiegel erreicht als das Vatnsdalsá-Gebiet. Die Eisschilde wirken als Niederschlagsfänger. Das geht auch aus radiometrischen Untersuchungen von B. Árnason (1976, 52 ff.) hervor: Der auf die Eisschilde in Höhen von 1200–1300 m ü. M. entfallende Niederschlag fließt zu 50 und mehr Prozent noch im gleichen hydrologischen Jahr ab.

Die aktuelle Gebietsverdunstung kann nur näherungsweise erfaßt werden, nämlich durch Berechnung aus Niederschlag und Abfluß. Für das Flußgebiet der Blanda ergibt sich dabei $V = 997 \text{ mm} - 799 \text{ mm} = 198 \text{ mm}$, für das der Vatnsdalsá $V = 617 \text{ mm} - 519 \text{ mm} = 26 \text{ mm}$. Damit werden für zwei unmittelbar benachbarte Flußgebiete sehr große Unterschiede der Verdunstung errechnet. Die im Vergleich zur Höhe des Gebietsniederschlags sehr große Abflußhöhe der Vatnsdalsá dürfte aus unterirdischem Zufluß herrühren. Die Annahme eines Grundwasserzuflusses von Süden her ins Niederschlagsgebiet der Vatnsdalsá wird durch radiometrische Grundwasseruntersuchungen von B. Árnason (1976, 159, 172) erhärtet, die für diesen Bereich eine nordwärts gerichtete Grundwasserbewegung erbrachten. Demnach reicht das Einzugsgebiet der Vatnsdalsá unterirdisch in das der Blanda hinein. Daher sollen zur Abschätzung der Verdunstungshöhe beide Niederschlagsgebiete zusammengefaßt werden. Unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Flächengröße ergibt sich dabei folgende Verdunstungshöhe $V = 917 \text{ mm} - 755 \text{ mm} = 162 \text{ mm}$. Bei einer mittleren jährlichen Gebietsverdunstung in Höhe von 162 mm im Vatnsdalsá-Gebiet ergibt sich für dieses ein unterirdischer Wasserzufluß in Höhe von $136 \text{ mm} (= 1,7 \text{ m}^3\text{s}^{-1})$ pro Jahr. Bezogen auf das Niederschlagsgebiet der Blanda macht diese Grundwasserbewegung 36 mm aus. Diese unterirdische Wasserbewegung wird bei der Ermittlung des Wasserhaushaltes als Größe Z berücksichtigt (vgl. Tab. 2 und Abb. 4).

Insgesamt werden im Blanda-Gebiet 83 Prozent des jährlichen Gebietsniederschlags dem oberirdischen Abfluß zugeführt. Im Flußgebiet der Vatnsdalsá sind es 78 Prozent. Diese sehr großen Abflußfaktoren beider Flußgebiete ergeben sich aus der geringen aktuellen Verdunstung. Diese resultiert außer aus den klimatischen

		Sep.	Okt.	Nov.	Dez.	Jan.	Feb.	März	Apr.	Mai	Jun.	Jul.	Aug.	Jahr
Blanda	N	90	124	93	92	81	84	81	71	48	66	81	86	997
	N - Z	87	121	90	89	78	81	78	68	45	63	78	83	961
	A	70	60	42	37	35	37	43	74	119	85	98	99	799
	N - Z - A	17	61	48	52	43	44	35	-6	-74	-22	-20	-16	162
	V	11	3	1	1	0	3	6	14	30	37	34	22	162
	(R - B)	6	58	47	51	43	41	29	-20	-104	-59	-54	-38	0
	$\Sigma(R - B)$	6	64	111	162	205	246	275	255	151	92	38	0	

Vatnsdalsá	N	56	77	58	57	50	52	50	44	29	41	50	53	617
	N - Z	67	88	69	69	61	63	61	56	40	52	62	65	753
	A	36	40	38	38	38	36	44	70	111	64	40	36	591
	N - Z - A	31	48	31	31	23	27	17	-14	-71	-12	22	29	162
	V	11	3	1	1	0	3	6	14	30	37	34	22	162
	(R - B)	20	45	30	30	23	24	11	-28	-101	-49	-12	7	0
	$\Sigma(R - B)$	20	65	95	125	148	172	183	155	54	5	-7	0	

Tab. 2:

Der mittlere Wasserhaushalt der Blanda und Vatnsdalsá im Zeitraum 1950–1979 aus Niederschlag (N), unterirdischem Zu- und Abfluß (Z), Abfluß (A) und Verdunstung (V) sowie der mittlere Gang des Wasservorrates aus Rücklage minus Aufbrauch (R - B). (Alle Angaben in mm Wasseräquivalent).

Parametern aus dem Fehlen einer geschlossenen Vegetation und aus der hochgradigen Permeabilität des Untergrundes, die zu einem raschen Versickern der Niederschläge im Sommer führt. So liegt nach zahlreichen Bohrungen der Grundwasserspiegel in 2–15 m Tiefe (vgl. A. Gudmundsson und B. Jónsson 1979), womit das Sickerwasser dem Einfluß der Verdunstung, die in sandigem Lockermaterial, wie es hier vorliegt, bis etwa 2 m Bodentiefe reicht (vgl. V. T. Chow 1964, 11–18), weitgehend entzogen ist.

Der mittlere Jahresgang des Abflusses

Der mittlere Jahresgang des Abflusses von Blanda und Vatnsdalsá findet sich, aufgeschlüsselt nach Abflußmenge, Abflußmengensumme, Abflußspende und Abflußhöhe zusammen mit der Abflußvarianz in Tab. 1 und Abb. 3 dargestellt. Auch im Jahresgang des Abflusses spiegelt sich zunächst wider, daß die Abflußmenge der Blanda wegen des größeren Einzugsgebietes erheblich größer ist als diejenige der Vatnsdalsá. Die aus den Abflußspenden berechneten mittleren monatlichen Abflußhöhen weisen jedoch diese Unterschiede nicht so deutlich auf.

Bei der Vatnsdalsá liegt die mittlere monatliche Abflußhöhe über fast das ganze Jahr hinweg bei 38 mm und steigt während der Schneeschmelze im Vorsommer (April, Mai, Juni) beträchtlich an, im Mai auf Werte von über 100 mm. Der Basisabfluß der Vatnsdalsá weist damit eine bemerkenswerte Konstanz auf, was sich in vergleichsweise geringen Werten der monatlichen Abflußvarianz ausdrückt. Diese findet ihre Begründung in der Konstanz des unterirdischen Zuflusses sowie in der Existenz von Seen als Rückhaltebecken. Die über den jährlichen Basisabfluß in Höhe von 456 mm hinausgehende jährliche Abflußhöhe von 135 mm ist der Oberflächenabfluß, der im wesentlichen aus der Schneeschmelze stammt. Dabei konzentriert sich der Oberflächenabfluß im Mittel auf drei Monate, mit dem Maximum im Mai (vgl. Abb. 3) bei einem Abflußkoeffizienten von 2,38.

Die mittlere monatliche Abflußhöhe der Blanda hingegen beträgt im September noch 70 mm und sinkt erst im November auf Werte um 40 mm ab. Dieser monatliche

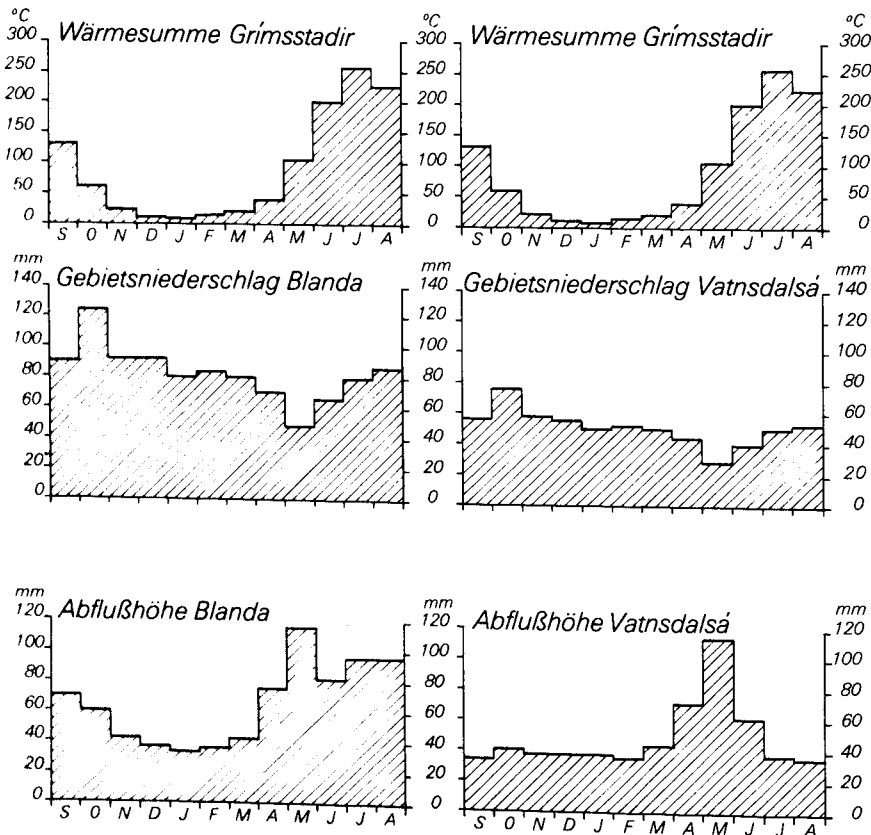


Abb. 3:

Der mittlere Jahresgang der Abflußhöhe und des Gebietsniederschlages der Blanda und der Vatnsdalsá sowie der Wärmesumme von Grímsstadir (1950-1979).

Basisabfluß entspricht weitgehend demjenigen der Vatnsdalsá. Wie bei der Vatnsdalsá steigt auch bei der Blanda die Abflußhöhe im April, Mai und Juni scharf an mit einem maximalen Abflußkoeffizienten von 1,74. Dabei liegt die Abflußhöhe der Blanda sehr deutlich über der Abflußhöhe der Vatnsdalsá und erreicht im Juli und August ein weiteres Abflußmaximum (vgl. Abb. 3). Zu diesem Zeitpunkt ist die Abflußhöhe der Vatnsdalsá bereits wieder auf die Werte des monatlichen Basisabflusses von rund 38 mm zurückgegangen. Der sommerliche Abfluß der Blanda ist somit nicht nur erheblich größer als derjenige der Vatnsdalsá, sondern weist zudem zwei Abflußspitzen auf. Die erste im Vorsommer entspricht zeitlich derjenigen der Vatnsdalsá, die zweite im Sommer resultiert im wesentlichen aus oberflächlich abfließendem Gletscherschmelzwasser. Dieser hohe sommerliche Abfluß der Blanda ist neben der größeren Abflußmenge das wichtigste unterscheidende Kennzeichen der Abflüsse beider Flußgebiete.

Beide Flußsysteme unterscheiden sich des weiteren hinsichtlich der monatlichen Abflußvarianz (vgl. Tab. 1). Die mittlere monatliche Abflußvarianz der Blanda beträgt 38%, die der Vatnsdalsá nur 28%. Das Ausmaß der Abflußvarianz in den einzelnen Monaten schwankt beträchtlich. Für beide Flußsysteme ist ein deutlicher Jahresgang der Abflußvarianz erkennbar, indem diese vom Herbst zum Frühjahr hin ansteigt. Bei der Blanda ist die Abflußvarianz im Februar am größten, bei der Vatnsdalsá erst im April. Danach sinkt die Abflußvarianz wieder ab, wobei Minimumwerte bei der Blanda mit 20% im Juli und bei der Vatnsdalsá mit 15% im September und August erreicht werden.

Für die folgende Skizzierung des Jahresganges des mittleren Wasserhaushaltes beider Flußgebiete wird von einer mittleren jährlichen aktuellen Verdunstungshöhe von 162 mm ausgegangen. Die Aufteilung auf die einzelnen Monate erfolgt nach dem Anteil der mittleren Monatshöhe der potentiellen Evaporation an der Jahres-Evaporation, die M. Einarsson (1972) für 28 isländische Stationen berechnet hat: Die Gebietsverdunstung weist einen ausgeprägten Jahresgang auf, und zwar mit einem Minimum im Winter und einem Maximum im Sommer (vgl. Tab. 2).

Der mittlere monatliche Gebietsniederschlag wird aus dem jährlichen Gebietsniederschlag gemäß dem mittleren prozentualen Anteil der Monatsniederschläge am Jahresniederschlag der benachbarten Stationen Haell und Nautabú ermittelt, die nach Korrelationsanalysen von allen benachbarten langfristigen Niederschlagsmeßstationen den Niederschlag der beiden Flußgebiete am besten repräsentieren. Bei der Bilanzierung des Niederschlages als Input der beiden Flußgebiete wird der unterirdische Zu- bzw. Ausfluß als Größe Z berücksichtigt (vgl. Tab. 2).

Die Bilanzierung des mittleren Jahresganges des Wasserhaushaltes für die Einzugsgebiete der Blanda und Vatnsdalsá findet sich in Tab. 2 und Abb. 4 zusammengestellt. Eine wichtige Fragestellung dieser Synthese der Wasserhaushaltselemente gilt dem mittleren Jahresgang des Vorrates. In beiden Flußgebieten ist, ausgehend vom Niveau zu Beginn des Haushaltsjahres, die Bilanz Rücklage minus Aufbrauch ($R-B$) von September bis März positiv. Der angesammelte Wasservorrat erreicht sein Maximum im März. Der Aufbrauch setzt im April ein und hält bis August an. Außer

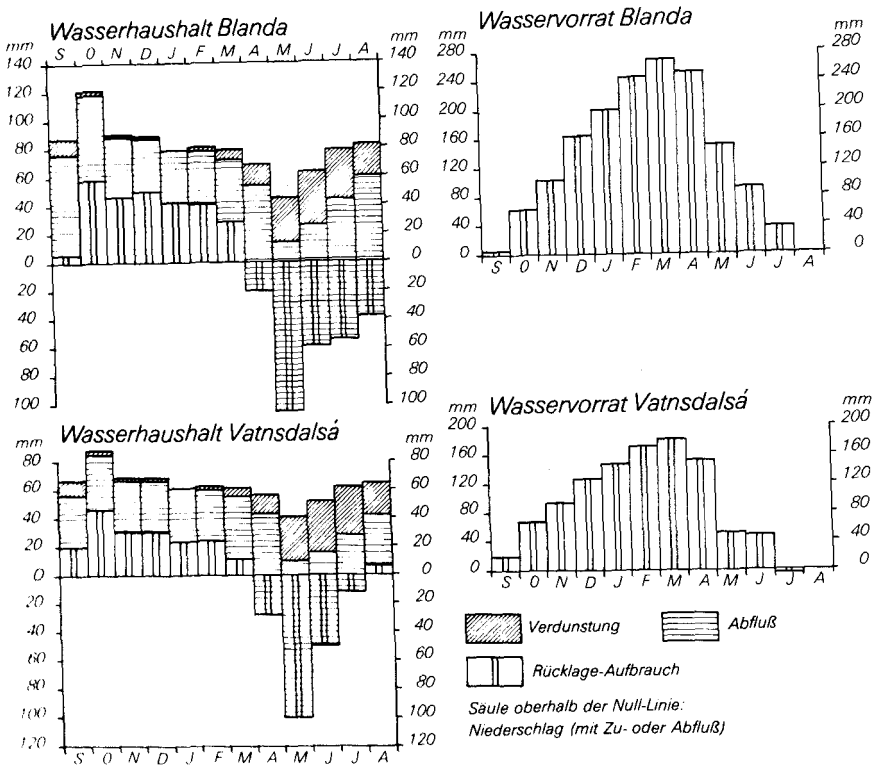


Abb. 4:

Der mittlere Jahresgang von Wasserhaushalt und Wasservorrat der Blanda und Vatnsdalsá (1950–1979).

diesen grundsätzlichen Gemeinsamkeiten weist der mittlere Jahresgang des Wasservorrates beider Flußgebiete auch markante Unterschiede auf. So erreicht die Wassermagazinierung im Gebiet der Blanda eine viel größere Höhe als im Gebiet der Vatnsdalsá. Diese Differenz nimmt im April den größten Wert an. Weiterhin weist der Wasservorrat im Blanda-Gebiet das ganze Jahr hindurch positive Werte auf, während derjenige des Vatnsdalsá-Gebietes ab Mai negative Werte annähme und mit einer negativen Bilanz abschloße, wenn diese nicht durch unterirdischen Zufluß aus dem Blanda-Gebiet ausgeglichen würde.

Der Jahresgang des Abflusses wird bei beiden Flußgebieten von unterschiedlichen klimatischen Parametern gesteuert. Das bemerkenswerteste Kennzeichen des Jahresganges vom Abfluß der Vatnsdalsá ist die deutliche Abhängigkeit der monatlichen Abflußhöhe von der monatlichen Niederschlagshöhe ($r_{A/N} = 0,76$). Zur monatlichen Wärmesumme hingegen besteht keine Beziehung ($r_{A/WS} = 0,07$). Das bemerkenswerteste Kennzeichen des jährlichen Abflußganges der Blanda ist demgegenüber die geringe Abhängigkeit der monatlichen Abflußhöhe von der Niederschlagshöhe des

gleichen Monats ($r_{A/N} = 0,25$) und die deutliche Abhängigkeit von der monatlichen Wärmesumme ($r_{A/WS} = 0,79$). Damit wird der jährliche Abflußgang der Vatnsdalsá vor allem durch den Gang der Niederschläge beeinflusst, derjenige der Blanda hingegen bevorzugt durch den Gang der Wärmesumme (vgl. Abb. 3).

Das charakteristische gemeinsame Merkmal des jährlichen Abflußganges beider Flußgebiete ist die Niederschlagsmagazinierung im Winter und die zum Abflußmaximum führende Schneeschmelze im Sommer. Der Jahresgang der Schneemagazinierung findet sich zusammen mit dem Jahresgang für verschiedene andere hydrologisch relevante Parameter, angegeben in Pentadenmittelwerten, für das seit 1960 sommerwärmste Jahr 1976 und das seit 1960 sommerkühlste Jahr 1979 in Abb. 5 zusammengestellt. Der nivometrische Koeffizient, ausgedrückt durch den Anteil der Schneetage an den Niederschlagstagen der Station Hveravellir, beträgt 70% (1966–1979). Im langjährigen Mittel (1966–1979) der Station Hveravellir reicht die Zeit annähernd vollständiger Schneebedeckung des Bodens von November bis April. Ihre größte Mächtigkeit hat die Schneedecke zumeist im April. Von April bis Juni nehmen das Ausmaß der flächenhaften Schneebedeckung sowie die Schneemächtigkeit in Abhängigkeit vom Temperaturanstieg rasch ab. Im Juli und August ist die Schneedecke bis auf geringfügige Reste verschwunden. Die Abhängigkeit der Abflußspitzen im April/Mai/Juni vom Schwinden der Schneedecke und vom Temperaturanstieg in zwei thermischen Extremjahren geht aus Abb. 5 deutlich hervor.

Aus der in Hveravellir unmittelbar vor Beginn der Schneeschmelze erreichten mittleren maximalen Schneehöhe von 82,1 cm (1966–1979) ergäbe sich bei einer mittleren Schneedichte von $0,3 \text{ g cm}^{-3}$ (vgl. hierzu H. Ahlmann und S. Thorarinsson 1938, 420 ff.; O. Meinzer 1942, 129) ein Wasserwert von 246 mm. Unter Berücksichtigung der Verdunstungshöhe der Monate April bis Juni von rund 80 mm (vgl. Tab. 2) erlangt das Schneeschmelzwasser einen Abflußwert von 166 mm. Dieser Wert entspricht der Größenordnung nach dem Anteil des mittleren Oberflächenabflusses am Gesamtabfluß während der Zeit 1966–1979 in Höhe von 150 mm. Im langfristigen Mittel (1950–1979) beträgt bei der Vatnsdalsá der Basisabfluß 456 mm und der Oberflächenabfluß 135 mm. Bei der Blanda beträgt die Höhe des mittleren jährlichen Basisabflusses 468 mm. Geht man davon aus, daß von den verbleibenden 331 mm des mittleren Oberflächenabflusses wie bei der benachbarten Vatnsdalsá rund 135 mm dem Schneeschmelzwasser entstammen, dann hat der mittlere Oberflächenabfluß aus Gletscherschmelzwasser eine Höhe von 196 mm pro Jahr. Damit handelt es sich bei der Vatnsdalsá um ein montan-nivales Abflußregime und bei der Blanda um ein niveo-glaziales Abflußregime im Sinne von M. Pardé (1948).

3. Langfristige Abflußschwankungen

Der jährliche Abfluß der beiden Flußsysteme zeigt von Jahr zu Jahr eine beträchtliche Varianz. Diese beträgt bei der Blanda 14% und bei der Vatnsdalsá 12% im Mittel. Um die Tendenzen der langfristigen Abflußveränderungen deutlicher zu erfassen, werden aus den Jahreswerten 9-jährig übergreifende Mittelwerte berechnet.

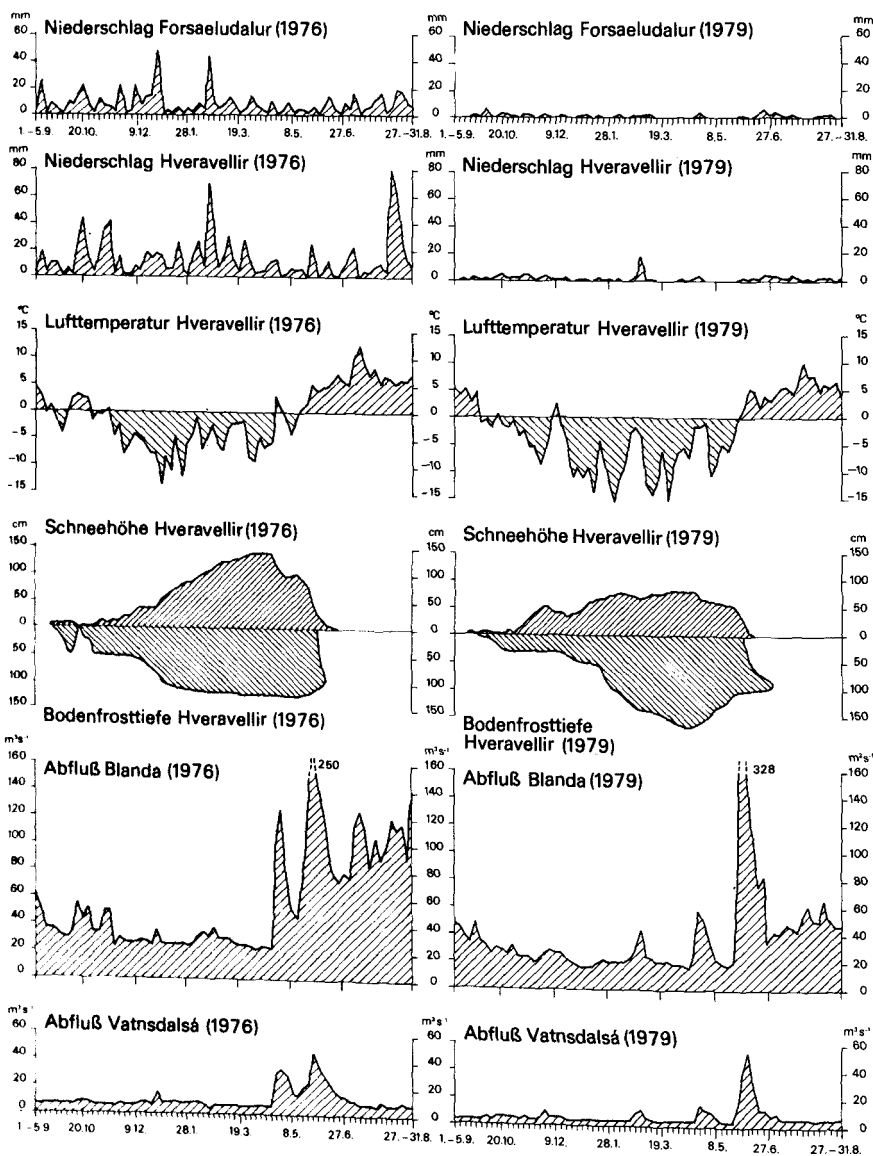


Abb. 5:

Ganglinien von Abfluß, Niederschlag, Lufttemperatur, Schneedeckenhöhe und Bodenfrosttiefe in den Flußgebieten von Blanda und Vatnsdalsá während des sommerwarmen Jahres 1976 und des sommerkühlen Jahres 1979 (Pentaden-Mittelwerte).

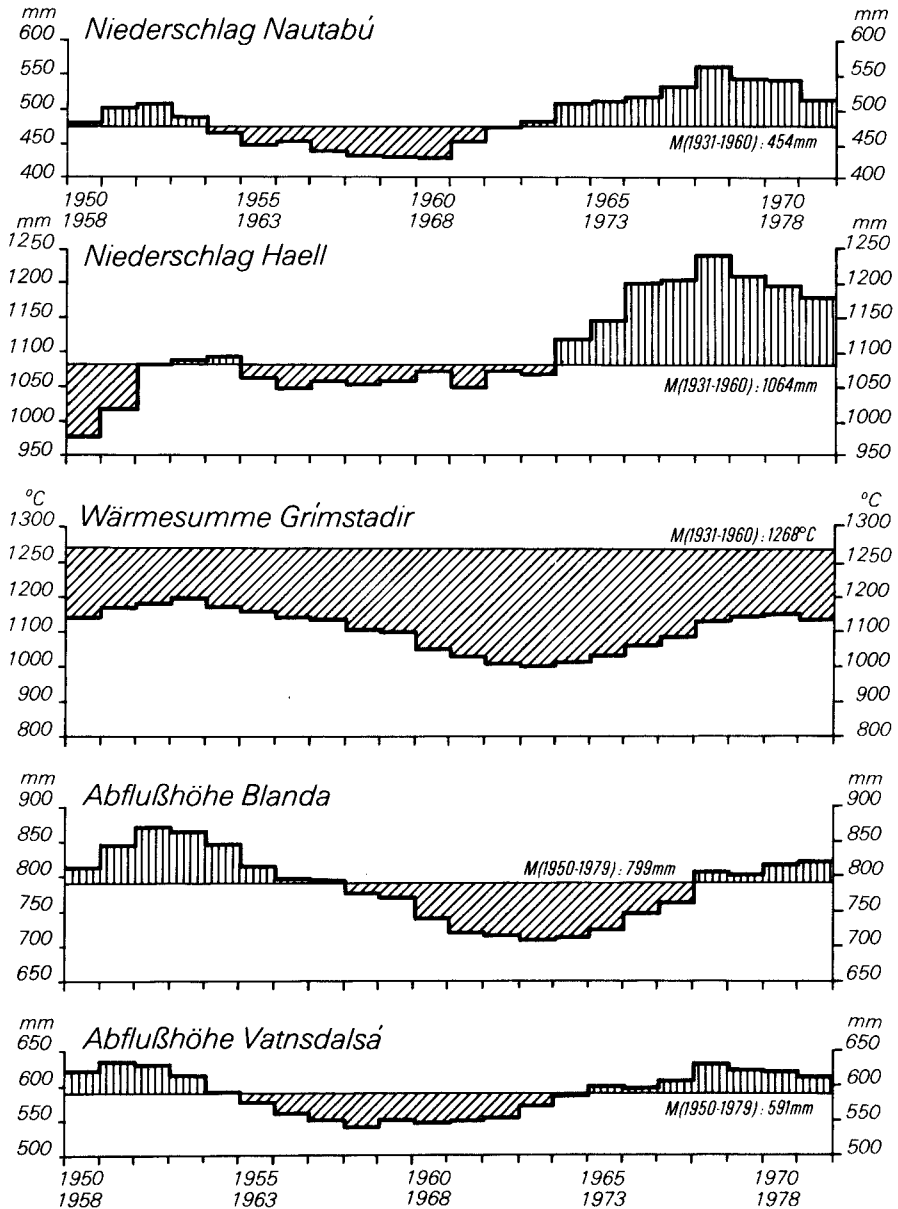


Abb. 6:

Gang der jährlichen Niederschlagshöhen in Nautabú und Haell, der jährlichen Wärmesumme in Grímstadir und der jährlichen Abflußhöhen von Blanda und Vatnsdalsá seit 1950 (9-jährig übergreifende Mittelwerte).

Aus ihrem Gang lassen sich seit 1950 langfristige Veränderungstendenzen des Abflusses beider Flußsysteme ablesen (vgl. Abb. 6).

Die Abflußtendenzen beider Flußsysteme weisen als Gemeinsamkeit hohe Abflußwerte zu Beginn der langfristigen Meßreihe in den 50er Jahren, ein folgendes Absinken und danach wieder einen Anstieg des Abflusses auf. Unterschiedlich sind die Zeitpunkte der Veränderungstendenzen. Die mittlere Abflußhöhe der Blanda steigt bis 1952/60 auf ein Maximum von 870 mm an und sinkt dann in den 60er Jahren stetig ab, und zwar bis auf 710 mm (1963/71). Seit den 70er Jahren ist dann wieder ein Anstieg zu verzeichnen, wobei die Abflußhöhe bislang noch nicht die Werte zu Beginn der 50er Jahre erreicht hat.

Einen anderen Verlauf der langfristigen Abflußtendenz zeigt die Vatnsdalsá. Nach einem Abflußmaximum von 634 mm in der Periode 1951/59 sinkt die Abflußhöhe ab auf ein Minimum von 543 mm in der Periode 1958/66. Danach steigt die Abflußhöhe seit Mitte der 60er Jahre an und erreicht in den 70er Jahren wieder Werte, wie sie zu Beginn der 50er Jahre auftreten. Damit unterscheiden sich die Abflußveränderungen beider Flußsysteme dadurch, daß die Abflußverminderung bei der Vatnsdalsá früher einsetzt und früher wieder in eine steigende Tendenz übergeht als bei der Blanda. Außerdem wird hierbei die ursprüngliche Abflußhöhe wieder erreicht, bei der Blanda nicht.

Diese Verschiedenheit der Abflußtendenz läßt vermuten, daß der Abfluß beider Flußsysteme von unterschiedlichen Parametern gesteuert wird. Bei der Blanda fällt die sehr gute Übereinstimmung der Abflußtendenz mit dem Gang der Wärmesumme auf. Die Niederschlagstendenz hingegen spiegelt sich in der Abflußkurve kaum wider (vgl. Abb. 6). Anders verhält es sich mit der Vatnsdalsá. Dort läßt sich die Abflußkurve zum größten Teil durch den Niederschlagsgang der Station Nautabú erklären (vgl. Abb. 6). Dabei gibt es trotz aller Übereinstimmung auch bemerkenswerte Unterschiede zwischen Niederschlags- und Abflußkurve. Am auffälligsten ist der Umstand, daß die wiederansteigenden Niederschlagshöhen ab 1964 deutlich über den Werten zu Beginn der 50er Jahre liegen, daß jedoch die Abflußhöhen die Werte vom Beginn der 50er Jahre nicht überschreiten. Diese Diskrepanz gibt den Hinweis, daß sich hierin eine durch die niedrigen Wärmesummen der 60er Jahre bewirkte Verminderung des unterirdischen Zuflusses aus Gletscherwasser widerspiegelt.

Die sich aus dem Gang der 9-jährig übergreifenden Jahresmittelwerte ergebenden Hinweise auf die Kausalitätsbeziehung zwischen den verschiedenen hydrologischen Parametern werden durch Korrelationsanalysen überprüft. Da in den Niederschlagsgebieten von Blanda und Vatnsdalsá keine Klimastationen existieren, deren Meßdaten bis 1949/50 zurückreichen, muß zunächst geklärt werden, welche der in der näheren Nachbarschaft der Untersuchungsgebiete gelegenen langfristigen Stationen die beiden im Untersuchungsraum befindlichen Klimastationen Forsaeludalur (ab 1956) und Hveravellir (ab 1965) in hygrischer und thermischer Hinsicht am besten repräsentieren. Für den Niederschlag ergibt sich aus Korrelationsanalysen, daß das Niederschlagsgebiet der Blanda am besten durch die Station Haell erfaßt wird ($r = 0,78$; Irrtumswahrscheinlichkeit $< 1\%$), während das der Vatnsdalsá am besten

durch die Station Nautabú vertreten wird ($r = 0,90$; Irrtumswahrscheinlichkeit $< 0,1\%$). Die Niederschlagsveränderungen der Station Nautabú und der Station Hveravellir im Blanda-Gebiet ($r = 0,30$; Irrtumswahrscheinlichkeit $> 5\%$) sowie der Station Haell und der Station Forsaeludalur im Vatnsdalsá-Gebiet ($r = 0,78$; Irrtumswahrscheinlichkeit $< 1\%$) weisen deutlich geringere Beziehungen zueinander auf. Offenbar wird das Niederschlagsgebiet der Blanda stärker von südlichen Luftströmungen beeinflusst, für die die südlich gelegene Station Haell repräsentativ ist (vgl. Abb. 1), das der Vatnsdalsá hingegen mehr von nördlichen.

Hinsichtlich des jahreszeitlichen Ganges sowie der langfristigen Veränderungen entsprechen die Lufttemperaturen der am Nordostrand Zentral-Islands gelegenen Hochland-Station Grímsstadir (384 m ü.M.) denen von Hveravellir am besten ($r = 0,97$), wobei die Lufttemperatur von Grímsstadir im Mittel um $1,3^\circ\text{C}$ höher liegt als die von Hveravellir. Daher werden im folgenden für die Analyse der Kausalitätsbeziehungen zwischen Abflußveränderungen und Veränderungen der thermischen Parameter die Meßwerte von Grímsstadir herangezogen.

Bereits bei der Analyse der Kausalitätsbeziehungen des Jahresganges des Abflusses der beiden Flußsysteme ergab sich für den Abfluß der Blanda eine signifikante Beziehung zum Jahresgang der Wärmesumme und für den der Vatnsdalsá eine bevorzugte Steuerung durch den Niederschlagsgang. Auch bei der Analyse der langfristigen Veränderungen des jährlichen Abflusses zeigt die Blanda eine Steuerung durch die Temperatur, d.h. über das Gletscherschmelzwasser ($r_{A/T} = 0,78$; Irrtumswahrscheinlichkeit $< 0,1\%$). Hingegen wird die Abflußveränderung der Vatnsdalsá deutlich weniger durch Temperaturveränderungen beeinflusst ($r_{A/T} = 0,41$; Irrtumswahrscheinlichkeit $< 5\%$).

Für die Analyse der thermischen Parameter der hydrologischen Systeme ist aber weniger die Mitteltemperatur des hydrologischen Jahres als vielmehr die Wärmesumme und die Kältesumme von Relevanz. Auf der Basis der repräsentativen Station Grímsstadir durchgeführte Korrelationsanalysen ergeben, daß dabei vor allem die Wärmesumme von Einfluß ist (Blanda: $r_{A/WS} = 0,74$; Vatnsdalsá: $r_{A/WS} = 0,33$), während die Kältesumme eine wesentlich geringere Beziehung zur Abflußhöhe aufweist (Blanda: $r_{A/KS} = 0,27$; Vatnsdalsá: $r_{A/KS} = 0,32$).

Unter Verwendung der Niederschlagsveränderungen der Station Haell für das Niederschlagsgebiet der Blanda und der Niederschlagsveränderungen der Station Nautabú für das Niederschlagsgebiet der Vatnsdalsá sowie auf der Basis der Wärmesumme von Grímsstadir für beide Flußgebiete lassen sich die Abflußhöhen der Blanda (1) und der Vatnsdalsá (2) durch folgende multiple Regressionsgleichungen quantifizieren:

$$A = -2,22 + 0,2 N + 0,52 WS \quad (1)$$

$$A = 4,03 + 0,68 N + 0,24 WS \quad (2).$$

Die anhand der multiplen Regressionsgleichungen für den Untersuchungszeitraum seit 1950 errechneten Abflußwerte zeigen bei etwas ausgeglichenerem Verlauf als die tatsächlichen Abflußwerte eine prinzipielle Übereinstimmung mit diesen. Die errech-

nete mittlere Abflußhöhe und ihre Standardabweichung (in Klammern die gemessene Abflußhöhe) betragen für die Blanda 789 ± 99 mm (799 ± 115 mm) und für die Vatnsdalsá 595 ± 80 mm (591 ± 73 mm). Errechnete und gemessene Abflußhöhen stimmen im 30-jährigen Untersuchungszeitraum signifikant überein (vgl. Abb. 6 und Abb. 7).

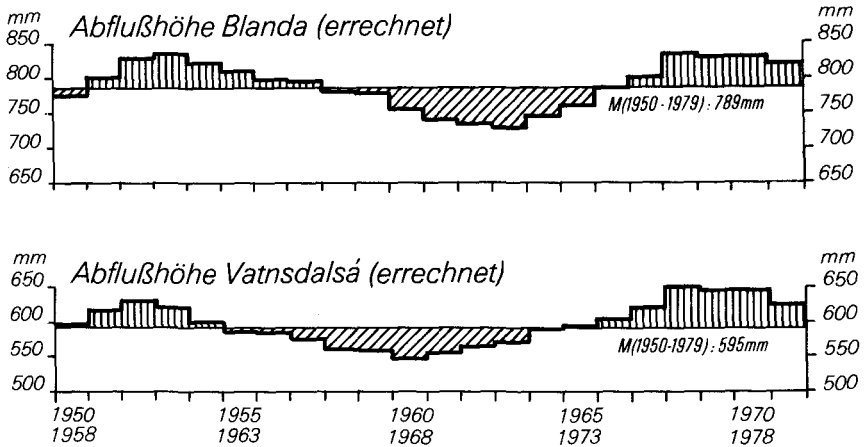


Abb. 7:

Gang der errechneten jährlichen Abflußhöhen von Blanda und Vatnsdalsá seit 1950
(9-jährig übergreifende Mittelwerte).

Noch deutlicher werden die gültigen Ursachen der Abflußtrends seit 1950 durch Korrelationsanalysen der übergreifenden 9-Jahresmittelwerte. Für den Abfluß der Blanda ergibt sich eine eindeutige Abhängigkeit von der Wärmesumme ($r_{A/WS} = 0,97$; Irrtumswahrscheinlichkeit $< 0,1\%$), während zum Niederschlagsgang der Station Haell keinerlei Zusammenhang erkennbar ist ($r_{A/N} = -0,04$). Umgekehrt zeigt der langfristige Abflußgang der Vatnsdalsá eine nur geringe Abhängigkeit von der Veränderung der Wärmesumme ($r_{A/WS} = 0,48$; Irrtumswahrscheinlichkeit $< 5\%$), hingegen eine deutliche Abhängigkeit vom Niederschlagstrend der Station Nautabú ($r_{A/N} = 0,85$; Irrtumswahrscheinlichkeit $< 0,1\%$).

Allgemeines Ergebnis einer faktoriellen Analyse der langfristigen Trends von Abflußhöhe, Niederschlagshöhe und Wärmesumme ist die Feststellung, daß thermische Veränderungen insbesondere den Abfluß der Blanda betreffen. Sie lassen aber auch die Abflußhöhe der Vatnsdalsá nicht unbeeinflusst. Hinsichtlich der Niederschlagshöhe ergibt sich nur für den Abfluß der Vatnsdalsá eine eindeutig direkte Kausalitätsbeziehung.

Dabei entsprechen die relativ niederschlagsarme Periode 1955–1969 einer Minde-
rung der Abflußhöhe der Vatnsdalsá und die niederschlagsreichen Perioden zu
Beginn der 50er Jahre und ab Ende der 60er Jahre einem Abflußhochstand. Bei der

Blanda tritt das Abflußminimum in der Ganglinie deutlich später auf als das Niederschlagsminimum und fällt mit dem Minimum im Gang der Wärmesumme zusammen. Hinsichtlich der thermischen Parameter wird deutlich, daß der Untersuchungszeitraum in eine Zeit dominanter Abkühlungstendenz fällt, insbesondere seit den 60er Jahren (vgl. E. Schunke 1979). Während dieser Abkühlungsphase liegen die Wärmesummen der Station Grímsstadir deutlich unter dem Normalwert (1931–1960) von 1268°C (vgl. Abb. 6). Aus dieser langfristigen Abkühlungstendenz resultiert ein Rückgang der Abflußhöhe, der erst seit Mitte der 70er Jahre wieder rückläufig ist.

Bei den langfristigen Veränderungen des jährlichen Abflusses bestehen zwischen der größten und der geringsten im Untersuchungszeitraum auftretenden Abflußhöhe beträchtliche Unterschiede. Die Quantifizierung dieser Unterschiede ist zum einen für den Landschaftshaushalt von Bedeutung, insbesondere für die fluviale Morphodynamik. Da die Blanda für eine Nutzung der Hydroenergie vorgesehen ist, spielen diese Unterschiede zum anderen für Kapazitätsberechnungen als Grundlage der Wasserkraftnutzung eine wichtige Rolle. Für die Blanda beträgt der Unterschied zwischen der größten Abflußhöhe (1976: 1116 mm) und der geringsten Abflußhöhe (1951: 603 mm) 513 mm. Für die Vatnsdalsá betragen diese Schwankungen zwischen der größten (1976: 784 mm) und der geringsten (1977: 513 mm) jährlichen Abflußhöhe 271 mm. Diese maximalen Differenzen der jährlichen Abflußhöhen entsprechen im Falle der Blanda einer Abflußmenge von 867 Gl und bei der Vatnsdalsá einer solchen von 212 Gl. Bezogen auf die mittlere jährliche Abflußmenge (1950–1979) der Blanda von 1336 Gl und der Vatnsdalsá von 267 Gl wird deutlich, daß diese Abflußveränderungen über die Hälfte der mittleren jährlichen Abflußmenge ausmachen können. Die Differenz zwischen der größten und der geringsten jährlichen Abflußmenge der Blanda im Untersuchungszeitraum in Höhe von 867 Gl ($= 0,867 \text{ km}^3$) entspricht beispielsweise fast dem fünffachen Fassungsvermögen ($181 \text{ Mio m}^3 = 0,18 \text{ km}^3$) der sechs großen Harz-Talsperren in Mitteleuropa. Es liegt auf der Hand, daß thermisch bedingte Veränderungen hydrologischer Parameter in der skizzierten Größenordnung von erheblicher Bedeutung für die fluviale Morphodynamik wie auch für die Nutzungspraxis sind.

Literatur:

- Ahlmann, H. W. und S. Thorarinsson (1938): The Vatnajökull Glacier: Preliminary Report of the Work of the Swedish-Icelandic Investigations 1936–1937. Geogr. Rev. 28, S. 412–438, London.
- Árnarsson, B. (1976): Groundwater Systems in Iceland. Vísindafélag Íslendinga 42, 236 S., Reykjavík.
- Büdel, J. (1948): Die klimamorphologischen Zonen der Polarländer. Erdk. 2, S. 22–53, Bonn.
- ,– (1950): Das System der klimatischen Morphologie. Wiss. Verh. Dt. Geogr.-Tg. München 1948, S. 65–100, Wiesbaden.
- Chow, V. T. (Hrsg.) (1964): Handbook of Applied Hydrology. 1418 S., New York.
- Church, M. J. (1972): Baffin Island Sandurs: A Study of Arctic Fluvial Processes. Bull. Geol. Surv. Canada 216, 208 S., Ottawa.

- Einarsson, M. (1972): Evaporation and Potential Evaporation in Iceland. Icelandic Meteorological Office, 23 S., Reykjavík.
- Eythorsson, J. und H. Sigtryggsson (1971): The Climate and Weather of Iceland. The Zoology of Iceland (hrsg. v. S.L. Tuxen), Vol. I, Part. 3, 62 S., Kopenhagen.
- Gudmundsson, A. und B. Jónsson (1979): Blönduvirkjun. Orkustofnun Raforkudeild Os79024/R0D07, 171 S., Reykjavík.
- Köppen, W. (1931): Grundriß der Klimakunde. (2. Aufl.), 388 S., Leipzig.
- McCann, S.B. und J.G. Cogley (1972): Hydrological Observations on a Small Arctic Catchment, Devon Island. Can. J. Earth Sci. 9, S. 361–365, Ottawa.
- ,– (1973): The Geomorphic Significance of Fluvial Activity at High Latitudes. Research in Polar and Alpine Geomorphology (hrsg. v. B.D. Fahey u. R.D. Thompson), 3. Guelph Symposium on Geomorphology 1973, S. 118–135, Guelph.
- McCann, S.B., Howarth, P.J. und J.G. Cogley (1972): Fluvial Processes in a Periglacial Environment, Queen Elizabeth Islands, N.W.T. Canada. Trans. Inst. Brit. Geogr. 55, S. 69–81, London.
- Meinzer, O. (Hrsg.) (1949): Hydrology. 712 S., New York.
- Nagel, G. (1979): Untersuchungen zum Wasserkreislauf in Periglazialgebieten. Kanada und das Nordpolargebiet (hrsg. v. L. Müller-Wille u. H. Schroeder-Lanz). Trierer Geogr. Stud., Sonder-H. 2, S. 157–178, Trier.
- Pardé, M. (1947): Fleuves et rivières. 224 S., Paris.
- Poser, H. (1932): Einige Untersuchungen zur Morphologie Ostgrönlands. Medd. om Grønland 94, 5, 55 S., Kopenhagen.
- ,– (1936): Talstudien aus Westspitzbergen und Ostgrönland. Z. f. Gletscherkde. 24, S. 43–98, Leipzig.
- Richter, K. (1981): Zum Wasserhaushalt im Einzugsgebiet der Jökulsá á Fjöllum, Zentral-Island. Ein Beitrag zur Hydrologie des Periglazialraumes. Math.-Nat. Diss., 110 S., Göttingen.
- Rist, S. (1956): Íslenzk Vötn (Icelandic Fresh Waters). Raforkumálastjóri Vatnaaelingar, 127 S., Reykjavík.
- ,– (1969): Vatnasvið Íslands. Orkustofnun Vatnaaelingar, 94 S., Reykjavík.
- Schunke, E. (1979): Aktuelle thermische Klimaverhältnisse am Polarrand der Ökumene Europas – Ausmaß, Ursachen und Auswirkungen. Erdk. 33, S. 282–291, Bonn.
- Schunke, E. und H. Stigl (1973): Neue Beobachtungen zum Luft- und Bodenfrostklima Islands. Geogr. Annaler 55 A, S. 1–23, Stockholm.
- Seifried, A. (1972): Canadian River Regimes. Flußregime und Wasserhaushalt II (hrsg. v. R. Keller), Freiburger Geogr. Hefte 12, S. 119–158, Freiburg.
- Thorgrímsson, S. (1973): Gnúpverjavirkjun. Geological Report. Orkustofnun Raforkudeild, 29 S., Reykjavík.
- Tómasson, H. und S. Thorgrímsson (1972): Nordlingaalda. Geological Report. Orkustofnun Raforkudeild, 19 S., Reykjavík.